

# 協調型サイクリングシミュレータを用いた左折自動車と直進自転車の錯綜パターンの安全性評価

山田 一太<sup>1</sup>・山中 英生<sup>2</sup>・吉田 長裕<sup>3</sup>・松本 修一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 徳島大学大学院 創成科学研究科理工学専攻 (〒770-0841 徳島県徳島市南常三島2-1)

E-mail: tAkunA.xx@gmAil.Com

<sup>2</sup>正会員 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 (〒770-0841 徳島県徳島市南常三島2-1)

E-mail:yAmAnAkA@Ce.tokusHimA-u.AC.jp

<sup>3</sup>正会員 大阪市立大学大学院 工学研究科 准教授 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail:yosHiDA@eng.osAkA-Cu.AC.jp

<sup>4</sup>正会員 文教大学 情報学部 准教授 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

E-mail:sHuiCHi@Bunkyo.AC.jp

自転車事故の多くが交差点で生じており、信号交差点では自動車の右左折時に生じる割合が高い。自転車の車道走行によって自転車の走行状態も多様化しており危険性の評価と対策が必要となっている。本論文は信号交差点における左折自動車と直進自転車の交通安全性を分析するため、既存研究より得られたデータを基に比較、分析することで、自転車と自動車の錯綜に交差点形状が与える影響を把握することを目的とした。既存研究で用いた実験方法としては、潜在的な危険性のある自転車走行パターンを選定し、交差点形状や自転車走行空間の異なる条件を設定して、自動車と自転車を同一仮想空間上で同時に操作できる協調型サイクリングシミュレータを用いて錯綜状態を再現した。安全評価指標として、自転車と自動車の衝突危険性を評価するためのTTC指標、接近速度、接近方向、被験者の不安感を用いて分析した。

**Key Wor** 協調型CS :BiCyCle,left turn ConflIct,CyCling simulAtor experiments

## 1. はじめに

我が国は世界的に見ても自転車利用率の高い国である。しかし交通安全面において、日本で発生する全事故の2割が自転車関連事故であり、人口当たりの死者数においても、他の先進国と比較して安全とは言えないとされる。このため、2012年に発出された安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン<sup>1)</sup>以後、自転車の車道通行を前提とした自転車交通の整序化が進められ、自転車の車道走行を基本とした交差点の設計の手引き<sup>2)</sup>が発出されている。また、2017年には自転車活用推進法が施行され、同推進計画<sup>3)</sup>では都道府県や各自治体で地方版の計画策定が促進<sup>4)</sup>されており、環境、健康、観光政策のもとで、自治体の地方版計画では上記ガイドラインに沿った自転車ネットワーク計画の策定が指示されている。自転車交通の安全性に関しては、交通事故件数はこの10年で約53%まで減少したが、自転車関連事故の事故件数は全事故に比べて減少の傾向が大きくなり、全数の事故に対する自転車関連事故の割合は

先進国の中で依然として高くなっている。

我が国の自転車事故は、約7割が交差点とその付近で発生している。信号交差点においては、自動車の右左折時の事故が多くを占めており、特に車道走行を促進する中で、自動車の左折時の安全性確保が着目されている。

このような背景を踏まえ、信号交差点における左折自動車と錯綜する自転車挙動に着目し、その危険性を評価し、さらに交差点形状や自転車空間整備の効果を検討することを研究課題として設定した。

## 2. 既存研究と本研究の目的

これまでに、自転車を考慮した信号交差点での安全性について、教習場構内での模擬実験や、マルチエージェントシミュレータを用いての交差点の自転車の整備方法を評価する研究が進められてきている。

小川ら<sup>5)</sup>は、左折自動車と直進自転車の交錯の実態を

調査した上で、そのような交錯を緩和するための交差点整備方式を提案し、それらを再現するシミュレーションを構築している。この結果「混在」型を基本とすることが適切で、遅れ時間を短縮できる方式である直進自転車と左折自動車を交差点手間で交差させる「交差」方式、安全感が確保できる両者の通行空間を交差点流入部まで分離する「分離」方式、といった方式を使い分けると望ましいとしている。

溝口ら<sup>9)</sup>は自動車左折時に自動車と自転車が同レーンに存在しない分離方式と同レーンに存在する混在方式の安全性をドライビングシミュレータを用いて、自動車・自転車それぞれを被験者とする実験を行って安全性を評価した結果、混在方式が自転車の不安は大きくなるが、TTC や衝突発生率などの指標から安全面ではむしろ優位であるとしている。

白川ら<sup>7)</sup>はサイクリングシミュレータを用いて右左折自動車と自転車との錯綜を再現した実験を、自転車が両側通行するワールド、左側通行のみのワールド、車道左側通行のみのワールドを再現して実験を行なった結果、TTC、最接近距離、危険感全ての評価指標で両側通行が危険で、車道左側通行が安全であることを明らかにした。

以上のように、交通ルールに従った自動車左折時の交通状況については安全性の評価が明らかになっているが、実際の交差点では、その形状等によって、ルール外の自転車の挙動が発生することや、自動車の左折時速度なども変化することから、こうした特性を考慮した評価を行って、事故対策を進めていくことが必要となっている。

このため、本研究グループでは、ビデオ観測分析<sup>8)</sup>およびタクシー搭載のドライブレコーダーデータの分析<sup>9)</sup>をもとに、左折自動車と錯綜現象を引き起こす自転車の走行パターンを抽出して、協調型サイクリングシミュレータを用いた分析を行ってきた。

2020 年度の研究(楠瀬ら<sup>10)</sup>)では、自転車と自動車の事故が多い交差点で見られた自転車挙動として「車道左側通行」「ショートカット走行」「横断帯通行」をとりあげ、広視野サイクリングシミュレータを用いた実験により自転車挙動の潜在的危険性および被験者の不安感を分析している。これを本論文では実験 1 と称する。

さらに 2021 年度の研究(山田ら<sup>11)</sup>)では「死角並走」、「廻り込み横断」、「逆走横断」のパターンを抽出し、協調型サイクリングシミュレータを用いて自転車通行空間、横断帯位置の異なる交差点において錯綜再現実験を行ない、TTC および接近速度、ドライバー不安感を用いて比較評価している。これを本論文では実験 2 とする。本論文では、これらの 2 つの実験をま

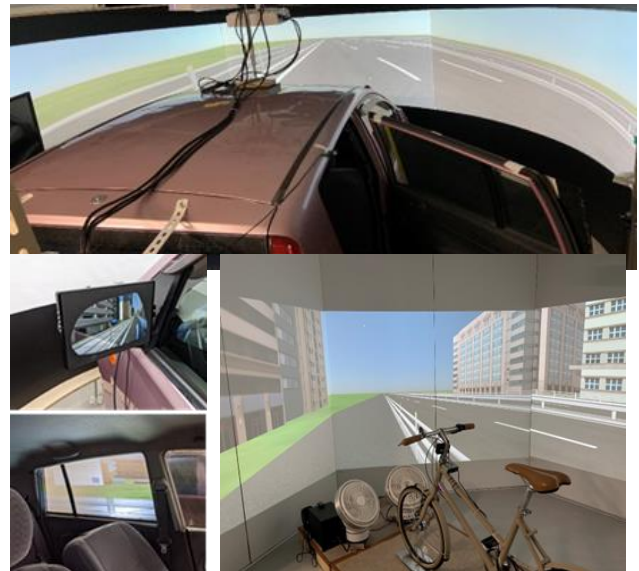


図-1 実験に用いた協調型自動車・自転車シミュレータ

とめて比較分析することで、自転車の走行パターン、交差点形状、自転車利用環境整備などの条件設定による安全性への影響について考察するとともに、左折時の自転車との錯綜に対する対策について考察することを目的とした。

### 3. 分析対象の選定と実験の概要

#### 3.1 協調型サイクリングシミュレータ

錯綜の危険性を評価するには、実道路での社会実験、路外実験、地域間比較等が考えられるが、衝突発生の恐れのある実物実験は実施困難である。このため、本研究では、衝突や危険な錯綜を含む実験を仮想空間上で実施可能な、協調型サイクリングシミュレータを用いて再現実験を行った。

図-1 に実験 1、2 に用いた協調型サイクリングシミュレータ(以下協調型 CS)を示す。実験 2 では、車両前面 180 度のシリンダースクリーン、バックミラーに加えて、左サイドミラー、左後方窓に運転者へ再現映像が投影される改良がされている。

DS は FORUM8 社製 UC-win RoAD ver. 15.02 の改良版を使用している。自転車および自動車それぞれが運転者となり、CS、DS を接続し、同一の仮想空間上で移動体験ができる。自転車運転者には自動車の接近時の走行音について 5.1CH のサウンドが再生されている。約 30 フレーム/秒の走行ログ(位置、速度、進行角度)が記録され、そのデータから安全指標を算出している。

#### 3.2 評価対象の自転車挙動と交差点モデルの作成

対象交差点形状と比較対象とした走行パターン選定、実験時の走行方向については以下の通りである。

(1) 対象とした交差点

実験 1 では既往研究<sup>8)</sup>でのビデオ観察結果をもとに、危険な自転車通行パターンや事故多発傾向が見られた東京都亀戸交差点と、比較対象として交差点形状の異なる東京都大森本町一丁目交差点の 2 か所の交差点を対象とした。(写真-1)

実験 2 では、前述の大森交差点をベースとし、自転車通行空間を拡幅・矢羽根設置したケース、横断歩道の交差端からのセットバックを変えた形状を比較対象として作成した。それぞれの交差点形状とその特徴を図-2 に示す。



亀戸



大森

写真-1 実験 1 での対象交差点

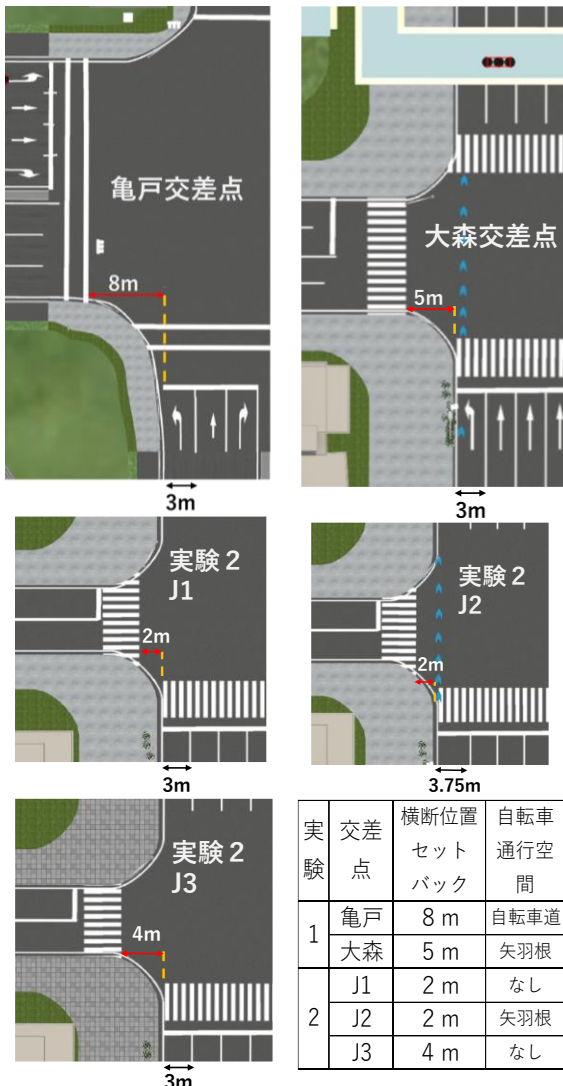
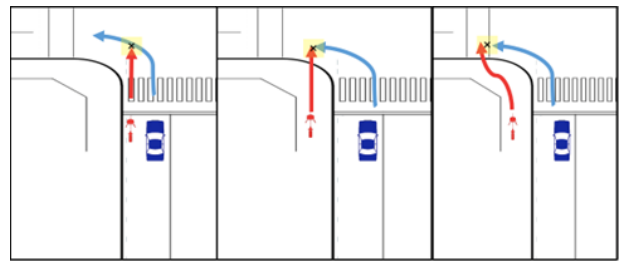
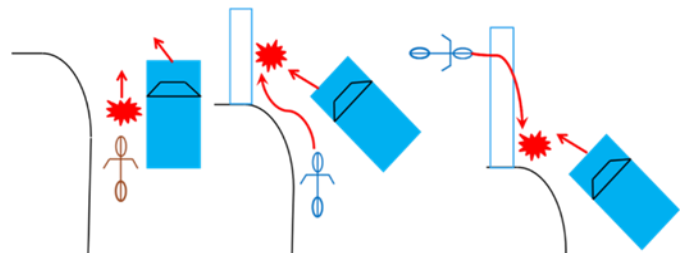


図-2 実験対象交差点の形状



A 車道直進 B ショートカット C 横断帯横断

図-3 実験 1 で対象とした自転車走行パターン



A' 死角並走 D 廻り込み H 逆横断

図-4 実験 2 で対象とした自転車走行パターン

(2) 走行パターンの選定

実験 1 では、亀戸交差点でのビデオ観測を基に自転車の走行パターンを選定した(図-2)。観測された自転車の走行パターンは、車道左側を通り横断する「車道左側通行」(パターン A)、自転車道から横断帯へセットバックせず直進して交差点を横断する「自転車道ショートカット通行」(パターン B)、自転車道から横断帯へセットバックして交差点を横断する「横断帯通行」(パターン C) の 3 パターンである。

実験 2 では、調査研究プロジェクトで行われた交差点のビデオ観測とヒヤリハット発生状況の分析<sup>10)</sup>をもとに、危険な自転車通行パターンを抽出した(図-3)。自動車左側後方の死角を並走して直進する「死角並走」(A' パターン)、車道から横断帯へ廻りこんで直進する「廻り込み」(D パターン)、自転車が自動車の左折先の反対車線から横断帯へと進入する「逆横断」(H パターン) の 3 パターンである。

(3) 実験時の走行指示方法

実験 1 では、自転車・自動車の双方を同時に出現させ、自転車にのみ走行パターンを指示し、自動車には自転車と併走して自転車に追従、もしくは追い越して左折するように指示した。その際、左折前の自動車の速度を一定に保つために、直進車両を走らせている。自動車が追いつく前に自転車が直進してしまうなど、錯綜現象が生じなかったケースは除外して、再度実験を行った。本実験では後方左の窓、左側ドアミラーの映像提示は行っていない。接近時のみ、自転車は前方に存在が確認できる。

実験 2 では、自動車のみを出現させ、前方の車に追

表-1 実験ケース

実験	ケース	自転車走行	交差点形状	左後確認映像	実験数
1	1 A1	A 車道直進	矢羽根無 セットバック長大	なし	41
	2 A2		大森 セットバック大		40
	3 B1	B ショートカット	矢羽根無 セットバック長大		42
	4 B2		大森 セットバック大		40
	5 C1	C 横断帯横断	矢羽根無 セットバック長大		40
	6 C2		大森 セットバック大		40
2	7 A'1	A' 死角並走	J1 矢羽根無 狭幅員	なし	31
	8		矢羽根有 狭幅員	あり	31
	9 A'2		J2 矢羽根有 広幅員	なし	30
	10	D 廻り込み	矢羽根有 広幅員	あり	31
	11 D1		J1 矢羽根無 狭幅員	なし	28
	12		矢羽根有 狭幅員	あり	29
	13 D2		J2 矢羽根有 広幅員	なし	30
	14	H 逆横断	矢羽根有 広幅員	あり	30
	15 H1		J1 セットバック小	なし	29
	16 H2		J3 セットバック大	なし	31
			計		543

従しながら、交差点で左折するように指示し、自転車には走行パターンを指示した。パターン A' では自動車がある地点を通過したタイミングで自動車の左後方の死角に出現させ、車道を直進するように指示している。またパターン D, H では、自動車の左折直前に歩行者を出現させることで、自動車の一時停止を促し、そのタイミングで自転車を出現させ、指示した走行パターンに従って運転してもらった。パターン D では自動車左後方の死角、パターン H では自転車の出現を隠すために左折先車線の対向に配置した大型車両の陰から自転車を出現させた。また、本実験では左後方の窓、左側ドアミラーの映像提示も実験条件としている。提示なし（死角自転車を認識していない状態を想定）、提示あり（確認すれば死角自転車を認識できる）状態を同数ケース実験した。

表-1 に上述の実験ケース別の条件一覧と各ケースの実験回数を示す。実験 2 は、左後方確認映像の有無のケースをまとめて、走行パターンと交差点形状の条件の違いで比較することとした。

### 3.3 安全性評価指標

安全評価には TTC（衝突前余裕時間, Time To Collision）、接近速度、被験者の不安感を用いた。

#### (1) 二次元 TTC 値

TTC は、自転車と自動車とが仮に速度と進行方向を維持した場合に衝突するまでに要する時間であり、小さいほど危険となる。TTC 値は回避挙動開始までの余裕時間と関連し、運転者の反応時間を考慮した危険性判断が

可能で、理解が容易な指標と言える。

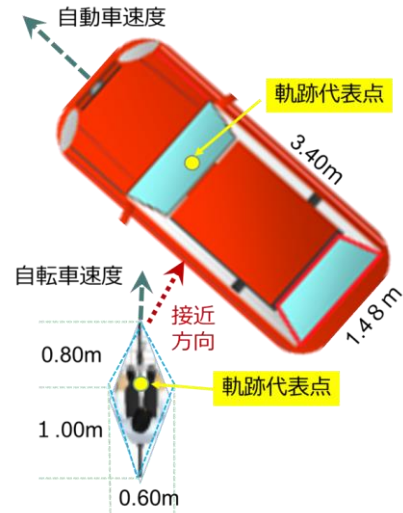


図-5 二次元 TTC 値, 接近速度

本研究では、図-5 に示すように、車両形状を考慮した 2 次元 TTC 値および接近距離、接近速度を用いた。2 次元 TTC 値は以下の方法で計測する。自転車と自動車の占有空間として、自動車は車長と車幅により四角形、自転車は車輪部の車長とハンドル部の車幅によるひし形として設定し、ある時点での存在位置および進行方向、速度ベクトル値をもとに、進行方向および速度ベクトルが一定とした時、0.01 秒ごとの占有空間を推測し、衝突有無（自転車の 4 端点が自動車の四角形領域内に入ることを判定）を確認して、10 秒以内に衝突が想定される場合を TTC 値とする。これを自動車と自転車の走行軌跡中に記録されている 0.1 秒ごとのログの全時点で推計し、最小値を実験ケースの TTC 値としている。

本研究では危険な TTC が生じやすいシミュレータの特性を加味して、0.5s 未満の発生頻度に注目した。なお、実験 2 の死角並走、廻り込み走行では、交差点手前で自動車と併走している状態で、自転車のふらつきや自動車への接近によって小さな TTC 値が発生していたことから、交差点手前 25m 以下の範囲内での最小 TTC を用いることにした。

#### (2) 接近速度

また、各時点での自動車の四角形の 4 辺と自転車の 4 端点間の最小距離を“接近距離”として、この接近距離の各時点での変化率（次時点の接近距離との差を時間差で除した値）を接近速度としている。

#### (3) 不安感

さらに、実験ケースごとに、自動車、自転車の不安感を 0-3 点の数値スケールで回答させて、主観的危険感の評価指標として用いた。

## 4. 実験結果

### 4.1 ケース別TTC値発生率

図-6 に実験ケース別の危険 TTC 値の発生率を比較した結果を示す。

矢羽根または幅員に注目してみると、車道走行のパターン A, A', またショートカットの B でも、矢羽根がある方が安全側の傾向がみられた。矢羽根によって自転車が側方を直進する可能性を意識させられたことが関係していると考えられる。加えてパターン A' では、幅員が広いことで自動車の側方を走る自転車との距離に余裕が持てたことも影響している。

一方、廻り込みのパターン D では、矢羽根有広幅員で、ニアミスが多く見られた。これは、幅員が広がったことで幅寄せが不十分になり、自転車の進入しやすくなっているためと考えられる。

次に歩道もしくは自転車道を自転車が行く場合の横断帯のセットバックに注目すると、パターン C, 逆横断の H 共に、セットバックがより小さい方で危険な TTC 値が多く観測された。これは、左折途中での錯綜発生による運転手への高負荷、自転車発見と衝突のポイントが近くなることが原因であると考えられる。

### 4.2 接近速度・衝突方向による分析

TTC 指標では、自転車を自動車が追従する状態などでは、自動車が加速した時などに小さな TTC が瞬間的に生じるが、実際には前方を注意していれば衝突の危険性は低くなる。これに対して、相手を発見しにくい側方からお互いが接近する場合には、同程度の TTC 値でもより危険性が高くなる。そこで、TTC 値が最小となる状態について、両者の接近方向と接近速度を確認して危険性を分析することとした。図-7 にケース別に接近速度、TTC 値と衝突方向の分布を示している。

これによると、車道走行のパターン A, A' ではあまり差が見られなかったが、ショートカットのパターン B, 歩道部・自転車道から横断のパターン C においては、危険な錯綜とされる車両側面での観測がセットバック大の大森交差点のケースで多く見られた。特にパターン C については接近速度も高い値を示した。交差点隅切半径が大きく、セットバックが 5 m 程度あることで、左折の加速時に錯綜が発生するためだと考えられる。

また左折自動車の前に回り込むパターン D においては、矢羽根があり幅員の大きい場合に、低い TTC 値と高い接近速度を示したケースが多くなっている。不十分な幅寄せにより自転車が容易に回り込みやすかったためだと考えられる。自転車が車道走行する場合に最も留意すべき自転車の走行パターンと言える。

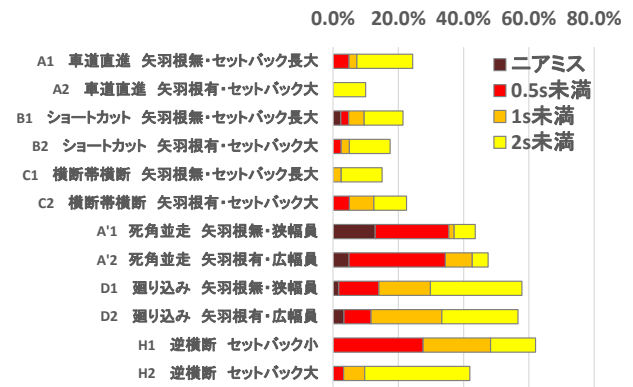


図-6 TTC 値区別の発生率の比較結果

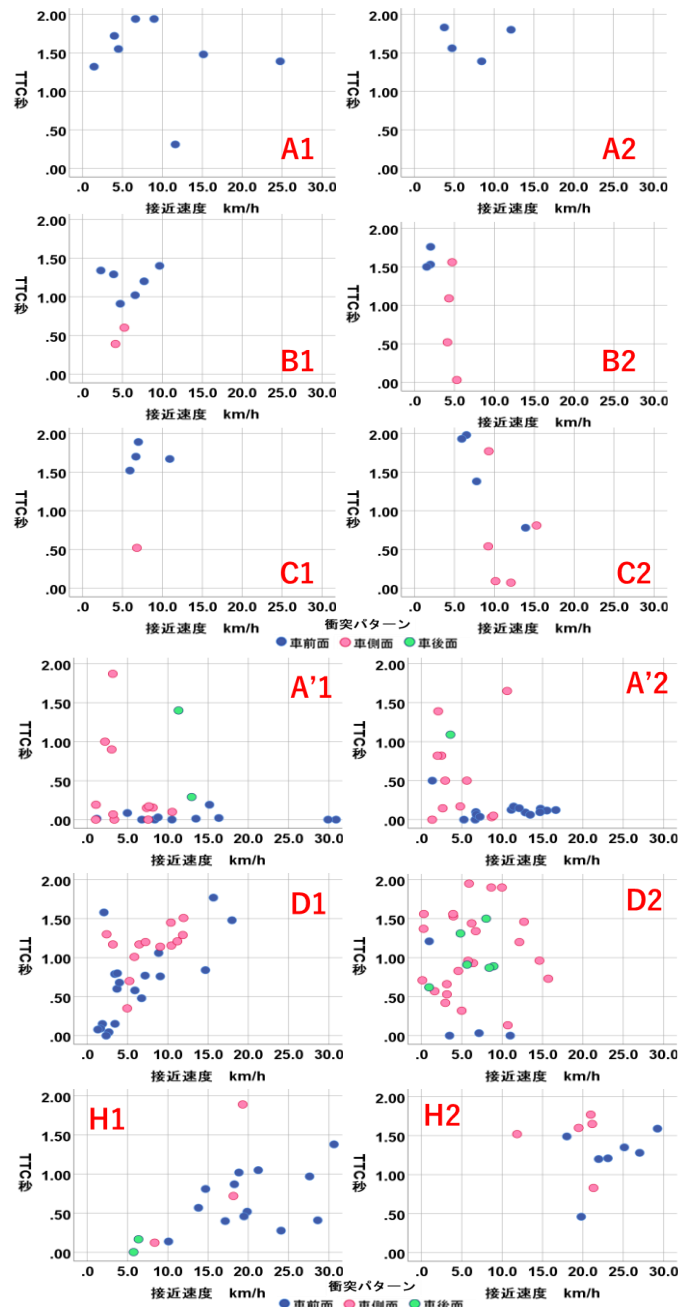


図-7 接近速度・TTC 値・衝突方向の比較

逆横断のパターン H においては、衝突方向は比較的 안전한車両前面のものが多かったが、形状に関わらず高

い接近速度が観測されており、注意が必要である。

### 4.3 不安感による分析

図-8 に自動車の不安感、図-9 には自転車の不安感を比較した結果を示す。

自動車の不安感に着目すると、車道走行のパターン A、ショートカットの B では矢羽根表示のない方が不安感が高くなるのに対し、死角並走のパターン A'、回り込み走行のパターン D では矢羽根表示のある方が不安感が高くなっている。矢羽根があり自転車の存在が予想されるにもかかわらず、交差点へ進入する前に自転車の視認できないことが自動車へ与える不安感に影響を与えることが予想される。

また歩道・自転車道から横断帯を横断するパターン C、H においては、横断帯のセットバックが小さい方で不安感が高かった。これはセットバックが小さいと、正対しない状態で自転車と錯綜することが理由と考えられる。

次に自転車の不安感についてみると、自動車と同様に車道走行のパターン A、A' において矢羽根のある方で不安感が低い。回り込みの D でも、自動車と異なり矢羽根のある方で不安感が低い。これは矢羽根によって自転車走行空間が確保されていることで、自動車との距離に余裕が出来るためだと考えられる。

ショートカットのパターン B では、矢羽根のある方で不安感が高い。矢羽根が示す走行方法と異なる走行をすることに不安を覚えるのではないかと予想される。

歩道・自転車道から横断帯を横断するパターン C、H においては、セットバックの低い方で不安感が高く、自動車の不安感と同様の結果を示した。

## 5. おわりに

本研究により TTC、不安感の両面から、全般としては、矢羽根表示のある道路の方が高い安全性を示すことが明らかとなった。ただし、矢羽根表示があることで、自動車に不安感を与えるケースも見られた。矢羽根は、自動車に側方を走行する自転車の存在を意識させ、自転車の安全な走行環境の整備に効果があると考えられる。

歩道・自転車道から横断帯を横断する場合の横断帯のセットバックについては、すべての指標において、セットバックの小さい方で危険性が高い傾向が見られた。接近速度が高いケースも多くみられる。プロテクテッド型の交差点を想定した場合、車道からのセットバックを確保することの必要性を示していると考えられる。

今後は、今回確認した交差点形状、自転車走行空間

以外の設計要素の影響、危険な自転車走行パターンを防止する形状や施策といった、事故防止のための施策の効果について検討していきたい。

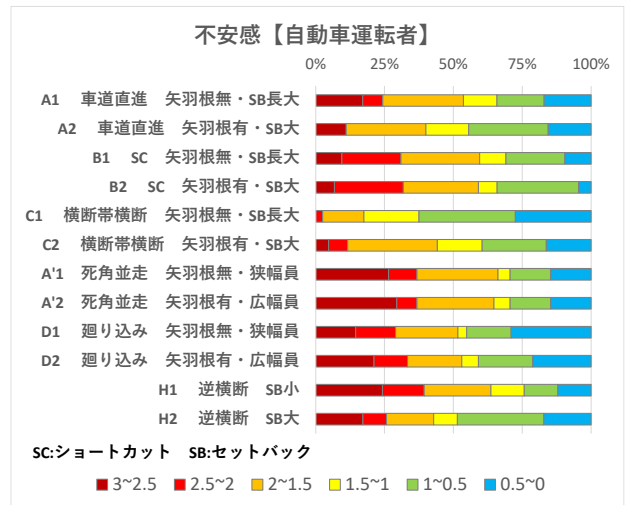


図-8 自動車運転者のケース別不安感

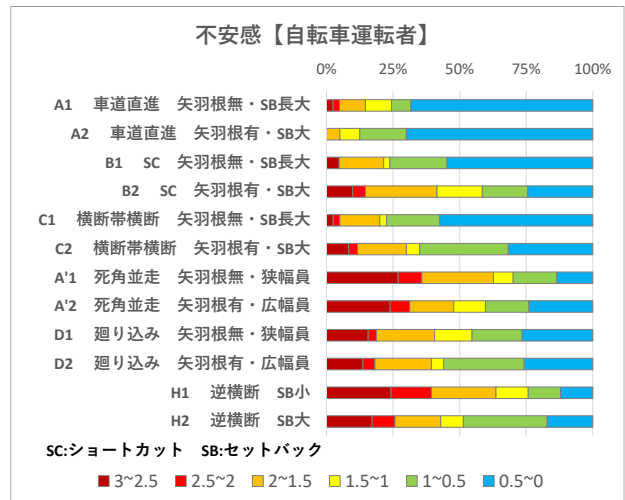


図-9 自転車運転者のケース別不安感

謝辞：本研究は国土交通省新道路技術会議、道路政策の質の向上に資する技術研究開発令和3年度の採択研究「車道基本の自転車通行環境整備による交通事故特性と新たな道路交通安全改善策に関する研究開発（研究代表者：吉田長裕）」において実施したものである。また、研究内容の一部は科学研究費基盤研究B（20H02278）の一環としても実施している。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局, 警察庁交通局; 安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン, 平成24年11月, 平成28年7月改定
- 2) 交通工学研究会: 自転車通行を考慮した交差点設計の手引き, 平成27年, 令和元年改定
- 3) 国土交通省自転車活用推進本部: 自転車活用推進計画, 平成30年, [https://www.mlit.go.jp/roAD/BiCyCleuse/gooD-CyCle-jApAn/Assets/pDf/jitensHA\\_kAtsuyo.pDf](https://www.mlit.go.jp/roAD/BiCyCleuse/gooD-CyCle-jApAn/Assets/pDf/jitensHA_kAtsuyo.pDf)
- 4) 国土交通省自転車活用推進本部: 地方版自転車活用指針計画策定の手引き(案), 2018.8, [https://www.mlit.go.jp/roAD/BiCyCleuse/gooD-CyCle-jApAn/Assets/pDf/jitensHA\\_kAtsuyo\\_loCAL.pDf](https://www.mlit.go.jp/roAD/BiCyCleuse/gooD-CyCle-jApAn/Assets/pDf/jitensHA_kAtsuyo_loCAL.pDf)
- 5) 小川 倫, 高見 淳史, 大森 宣暁, 原田 昇: 自転車と左折自動車の交錯を考慮した交差点整備方式の評価—マルチエージェント・シミュレーションを用いて—, 交通工学研究発表会論文集, No. 34, pp. 531-536, 2014.
- 6) 白川 瑛一, 吉岡 宏晃, 山中 英生, 尾野 薫, 中川 諒一郎: 協調型協調型CSを用いた信号交差点右左折時の自転車通行整序化の安全性評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 59, CD-ROM, 2019.
- 7) 山中 英生, 溝口 諒, 永松 啓伍: ドライビングシミュレータを用いた信号交差点左折時の自転車安全対策の評価実験: 土木学会論文集, Vol. 73, No5, pp. I-717-722, 2017.
- 8) 吉田長裕, 澤田和樹, 瀧澤重志: 信号交差点における高速畳み込みニューラルネットワーク手法による軌跡データを用いた自転車と左折車の錯綜分析, 交通工学研究会, 交通工学論文集, Vol. 8, No. 2, pp. A\_273-A\_280, 2022
- 9) 稲垣 具志, 吉田 長裕: ドライブレコーダデータを活用した車道における自転車と左折車の錯綜の類型化, 交通科学, Vol. 51, No. 2, pp. 28-33, 2020.
- 10) 楠瀬 史浩, 山中 英生, 吉田 長裕, 松本 修一: 広視角協調型サイクリングシミュレータを用いた左折自動車との錯綜現象の安全性評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 64, CD-ROM, 2021.
- 11) 山田 一太, 山中 英生, 吉田 長裕, 松本 修一: ドライビングシミュレータを用いた交差点における自転車・自動車錯綜分析, 交通工学研究発表会論文集(研究論文), No. 42, 2022. 9

## SAfety EvAluAtion of ConfuseD PAtterns Between Left-Turning Motor VeHiCles AnD StrAigHt-Coming BiCyCles Using A CooperAtive CyCling SimulAtor

IttA YAMADA, HiDeo YAMANAKA, NAgAHiro YOSHIDA, AnD SHuiCHi MATSUMOTO

Most BiCyCle ACCiDents oCCur At interseCtions, AnD A HigH perCentAge of tHese ACCiDents oCCur At signAlizeD interseCtions wHen veHiCles Are tuning rigHt or left. THE riDing ConDi-tions of BiCyCles HAVe Been DiversifieD By riDing BiCyCles on tHe roADwAy, AnD it is neCessAry to evAluAte tHe DAnger AnD to tAke CountermeAsures. THE purpose of tHis pAper is to AnAlyze tHe trAffiC sAfety of left-turning veHiCles AnD BiCyCles At signAlizeD interseCtions By CompAring AnD AnAlyzing DATa oBTaineD from existing stuDies to unDerstAnD tHe effeCts of interseCtion geome-try on BiCyCle-veHiCle ConflICts. THE experimeNtAl metHoD useD in tHe existing stuDies is A CooperA-tive CyCling simulAtor tHAt cAn simultAneously operAte A CAr AnD A BiCyCle in tHe sAme virtuAl spACe, AnD reproDuCe tHe situAtion of BiCyCle-CyCle junCtion wITh Different interseCtion geome-tries AnD spACes for BiCyCles. THE TTC inDex, ApproACHing speed, ApproACHing DireCtion, AnD suBjeCt's sense of AnxietY were useD As sAfety evAluAtion inDiCes.